

BOLETIN DE LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE

Cerámica y Vidrio

A R T I C U L O

Propiedades y aplicaciones de piezocomposites tipo címbalo

P. OCHOA, M. VILLEGAS, J.F. FERNÁNDEZ

Departamento de Electrocerámica, Instituto de Cerámica y Vidrio, CSIC, 28500 Arganda del Rey, Madrid, España

Los composites metal-cerámica tipo luna y címbalo consisten en discos piezoeléctricos encapsulados con cápsulas metálicas que poseen una cavidad. Esta cavidad favorece la amplificación de los efectos piezoeléctricos directo e inverso. Estos actuadores llenan el escalón entre actuadores multicapa, con desplazamientos pequeños y fuerzas generativas elevadas, y actuadores bimorfos, con desplazamientos grandes y fuerzas generativas pequeñas. El actuador tipo luna alcanza desplazamientos de más de 100mm, fuerzas generativas máximas de hasta varios N's, tiempos de respuesta desde 20 hasta 100ms, y baja respuesta en ensayos de fatiga a más de 10^7 ciclos. Los actuadores tipo címbalo muestran desplazamientos dos veces mayores que los obtenidos con actuadores tipo luna para el mismo tamaño, fuerzas generativas mucho mayores y la posibilidad de eliminar la dependencia del desplazamiento con la temperatura mediante selección de los materiales. Además poseen unas características únicas de sintonización que permiten seleccionar distintas frecuencias de resonancia con el mismo actuador.

Palabras clave: actuador piezoeléctrico, címbalo, piezocomposite, hidrófono, acelerómetro.

Properties and Applications of Cymbal piezocomposites

The metal-ceramic composite actuators, moonies and cymbals consist in capped piezoceramic disks with metallic endcaps having cavities inside. These cavities favour the amplification of direct and reverse piezoelectric effects. These actuators fill the gap between high displacement low generative force bimorph actuators and low displacement high generative force multilayer ceramic actuators. The moonie actuator can give displacements greater than 100 mm, maximum generative force of 3N to several N's, response time of 20 to 100 ms, and low fatigue test response for more than 10^7 cycles. Cymbals actuators shows twice as big as displacement than moonie for the studied size, much higher generative force and the possibility to avoid the temperature dependence of the displacement for selected materials. Properties of cymbal actuators can be tailored through the selection of materials. Also, cymbal actuators can be tuned to adopt different resonance frequencies.

Key word: piezoelectric actuator, cymbal, piezocomposite, hydrophone, accelerometer

***Trabajo presentado en la II Reunión Iberoamericana en Materiales Electrocerámicos (México, Abril 2000).**

1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de dispositivos más precisos en campos como la óptica, robótica, microcirugía y la demanda de motores cada vez más pequeños han renovado el enfoque en el diseño de transductores de desplazamiento (1). Los transductores de desplazamiento pueden ser clasificados en dos grupos principales. El primer grupo consiste en transductores de desplazamiento convencionales: cilindros de presión de aceite, motores servo o "paso a paso" y bobinas de altavoz. Cada uno de estos tipos de dispositivos de desplazamiento convencionales generan desplazamientos grandes, pero necesitan mucho espacio, su precisión en posicionamiento es insuficiente y tienen tiempos de respuesta grandes. El segundo grupo incluye los transductores (actuadores) de desplazamiento de estado sólido: efecto de memoria de forma, magnetostrictivos y piezoeléctricos/electrostrictivos (2-4). Las características de los actuadores de estado sólido están recogidas en la Tabla I.

El interés actual en actuadores piezoeléctricos/electrostrictivos está provocado por el reciente desarrollo de materiales cerámicos con prestaciones avanzadas. Los materiales pie-

TABLA I. COMPARACIÓN ENTRE ACTUADORES DE ESTADO SÓLIDO.

	Piezoeléctrico	Magnetostrictivo	Memoria de Forma
Clase Ferroica	Ferroeléctrico	Ferromagnético	Ferroelástico
Fuerza de conmutación	Campo Eléctrico	Campo Magnético	Tensión Térmica
Deformación	0.1% (2)	0.1-0.2% (3)	7-10% (4)
Velocidad de respuesta	μ s	μ s	s
Fuerza Generatriz (por cm^2)	3500	3500	20000
Eficiencia	50%	80-90%	3%
Ejemplo	PZT	Terfenol	Nitinol

zoeléctricos transforman energía eléctrica en energía mecánica o acústica y viceversa. Cuando se aplica un campo eléctrico paralelamente a la dirección de polarización del material se produce una dilatación en la dirección longitudinal acompañada de una contracción en la dirección transversal. Hay dos diseños de actuadores piezoeléctricos que emplean este fenómeno para amplificar el desplazamiento en aplicaciones prácticas: actuadores cerámicos multicapa con electrodos internos

y actuadores bimorfos. Las ventajas de los actuadores piezoeléctricos multicapa son sus fuerzas generatrices elevadas y sus velocidades de respuesta altas. Sin embargo, son poco prácticos para determinadas aplicaciones debido a sus desplazamientos pequeños y capacitancia elevada. Por otro lado, los actuadores bimorfos generan desplazamientos grandes, pero desarrollan una fuerza generatriz pequeña.

Es necesario un actuador con niveles intermedios de desplazamiento y fuerza generatriz. Los actuadores tipo "luna" y "címalo", que trabajan en modo flexional y rotacional-flexional, fueron diseñados para llenar el escalón entre actuadores multicapa y bimorfos (5-6).

2. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DE ACTUADORES TIPO LUNA Y CÍMALO

En los actuadores flexionales tipo luna y címalo se emplean como elementos activos materiales cerámicos de tipo piezoeléctrico, electrostrictivo y antiferroeléctrico-ferroeléctrico (7) a los que se adhieren dos cápsulas, que poseen una cavidad, fabricadas en vidrio, metal o plástico mediante aleaciones para soldadura o resinas epoxy. Se constituye así un material compuesto laminar con conectividad 2(0)-2-2(0) (8). Los diagramas de conectividades ofrecen información de cómo una fase está conectada consigo misma dentro de un material compuesto; 0: partícula aislada, 1: fibra, 2: laminado, 3: red tridimensional. Los paréntesis indican la existencia de una nueva fase que solo está conectada con la adyacente. Cuando la forma de la cavidad entre la cápsula y la cerámica es la de media luna se les denomina "luna", y cuando la forma es la de un cono truncado, "címalo". La configuración básica de los actuadores tipo luna y címalo se muestra en la Figura 1. Las cápsulas metálicas con cavidades sirven como transformadores mecánicos que convierten y amplifican el movimiento lateral de la cerámica en un desplazamiento axial. De esta forma, ambos coeficientes, d_{31} ($=d_{32}$ en un disco) y d_{33} de la cerámica piezoeléctrica contribuyen al desplazamiento axial del compuesto. El primer diseño de un actuador flexional fue el tipo luna. Este diseño se modificó posteriormente con el objeto de alcanzar mayores desplazamientos y reducir la concentración de tensiones en el material cerámico. Como consecuencia se obtienen mayores fuerzas generatrices y aumenta la fiabilidad, dando lugar al diseño tipo címalo.

3. PROPIEDADES DE LOS ACTUADORES TIPO LUNA

El efecto dimensional de las cápsulas en el comportamiento del actuador tipo luna ha sido estudiado experimentalmente en correlación con métodos de Análisis por Elementos Finitos, AEF, (6,7,9). El desplazamiento muestra una relación inversa con el espesor de la cápsula debido a un aumento de la flexibilidad de las mismas. Un actuador luna con una cápsula de latón de 0.3 mm de espesor y una relación entre diámetros del 80%, siendo la relación entre diámetros la proporción entre el diámetro interior de la cápsula y el diámetro exterior, muestra un desplazamiento de 22 mm bajo un campo eléctrico de 1 kV/mm. La dependencia del desplazamiento con otros parámetros de la geometría de la cápsula, como el diámetro y la profundidad de la cavidad, también se han estudiado. Cuanto mayor es el diámetro y la profundidad de la cavidad, mayor será el desplazamiento. Por otro lado, cuanto menor sea la cavidad, mayor será la velocidad de respuesta (7).

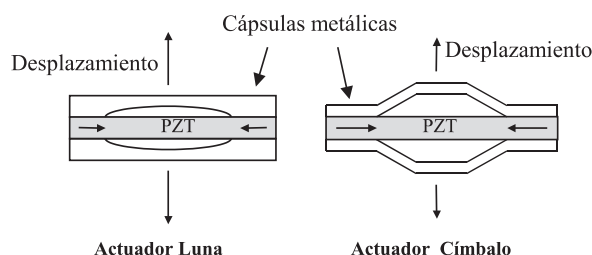


Figura 1. Configuración básica de actuadores tipo luna y címalo.

La fuerza generatriz de un actuador tipo luna decrece drásticamente cuando disminuye el espesor de la cápsula. Aunque el movimiento de flexión y por tanto el desplazamiento, son grandes en el centro de las cápsulas, la fuerza generatriz es menor en ese punto. Los desplazamientos disminuyen drásticamente al alejarse del punto central. A la inversa, la fuerza generatriz aumenta hasta alcanzar un máximo en la zona de unión con la cerámica piezoeléctrica.

Se pueden alcanzar valores de desplazamiento mayores mediante el apilamiento de actuadores tipo luna. Para dos actuadores tipo luna idénticos unidos por el centro de las cápsulas con una pasta epoxy de plata, se alcanza un desplazamiento de, aproximadamente, 40 μm para un campo aplicado de 1 kV/mm, lo que es un desplazamiento de casi el doble del obtenido con un actuador luna simple y de cerca de 40 veces el de un disco cerámico piezoeléctrico sin cápsulas. Se ha observado una pérdida en el desplazamiento cercana al 8% en un sistema de actuadores apilados. La razón de esta pérdida es la capa adhesiva epoxy conductora entre los actuadores apilados que actúa como un condensador, disminuyendo así la carga eléctrica que se transmite de un actuador a otro. También actúa como una discontinuidad mecánica que reduce la fuerza transmitida (8).

En la práctica es difícil emplear fuentes de 1 kV y constituyendo además un serio riesgo para la seguridad. De aquí que las cerámicas multicapa sean usadas como elementos activos para aplicaciones de bajo voltaje. Un cerámico piezoeléctrico multicapa también puede ser empleado como elemento activo cerámico en el diseño de un actuador luna, haciendo posible disminuir el voltaje aplicado sin sacrificar los niveles de desplazamiento. Para una cerámica multicapa de 50 capas de láminas delgadas cerámicas, cada una de 100 μm de espesor, fabricadas por Tokin Co, es suficiente una diferencia de potencial de 0.1 kV para generar un campo eléctrico de 1 kV/mm. Para este campo, un actuador cerámico multicapa produce un desplazamiento de, aproximadamente, 1.3 μm y un actuador luna multicapa muestra un desplazamiento de 24 μm (6).

La Figura 2 muestra las características de fatiga de un actuador tipo luna con diferentes espesores de cápsula sometido a un campo eléctrico alterno de 1 kV/mm a una frecuencia de 100 Hz. Los experimentos se realizaron a temperatura ambiente y sin carga. Después de 10^7 ciclos se observó una desviación en los desplazamientos de solo $\pm 0.8\%$. Antes y después de la prueba se midió el espectro de admitancia de los actuadores (6). El espectro de admitancia es extremadamente sensible a cualquier destrucción en la capa adhesiva e imperfecciones de la muestra. Después de las pruebas de fatiga no se observaron cambios significativos. Las frecuencias de resonancia y antiresonancia, así como las amplitudes de sus picos, fueron las mismas que los valores originales antes de la prueba de fatiga.

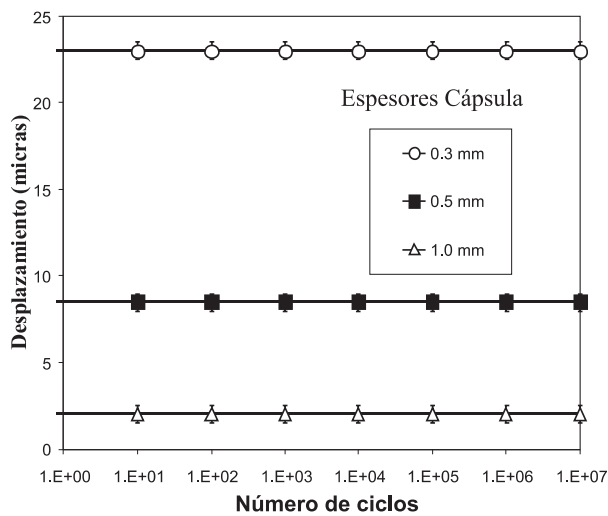


Figura 2. Características de fatiga de un actuador tipo luna sometido a un campo de 1 k V/mm a una frecuencia de 100 Hz. Adaptación de (8).

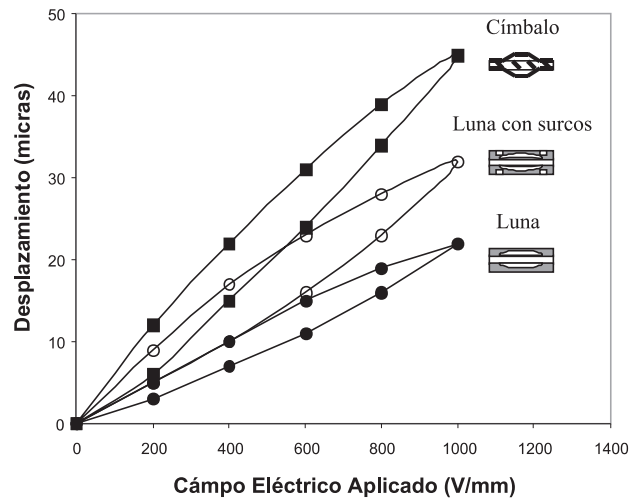


Figura 3. Comportamiento en desplazamiento de los diferentes diseños.

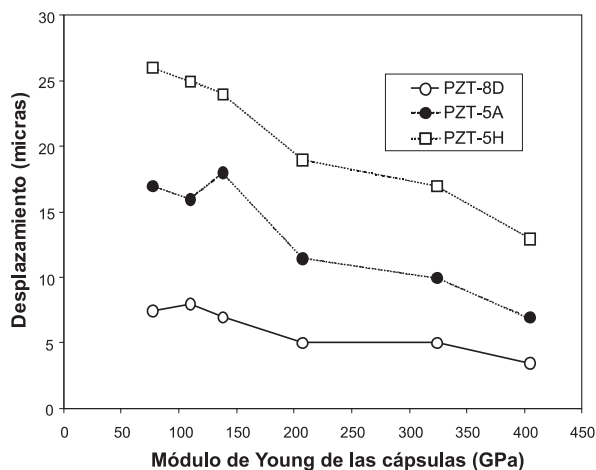


Figura 4. Desplazamiento de un actuador tipo címbalo en función del módulo de Young de las cápsulas metálicas. Adaptado de (10).

Análisis de elementos finitos, en correlación con los resultados experimentales, mostraron que hay una gran concentración de tensiones de compresión en las cápsulas, en la zona de unión con el material cerámico. Las pérdidas mecánicas debidas a esta concentración de tensiones reducen la eficacia de la transferencia de la fuerza desde el disco piezoelectrico a las cápsulas. Por lo tanto es necesario reducir esta concentración de tensiones con el fin de incrementar la eficiencia y conseguir mayores desplazamientos y fiabilidad. Para ello se eliminó parte del material en la zona de concentración de tensiones, mediante un surco en forma de anillo y como consecuencia se aumentó el desplazamiento. A partir de esta idea se desarrolló un diseño nuevo de actuador con cápsulas en forma de cono truncado que se denominó címbalo (6), Figura 1.

4. PROPIEDADES DE LOS ACTUADORES TIPO CÍMBALO

El comportamiento en desplazamiento de los diferentes diseños de cápsulas se muestra en la Figura 3. Con las cápsulas de tipo címbalo los valores de desplazamiento aumentan al doble de los obtenidos para los de tipo luna. El nuevo diseño de cápsula proporciona un desplazamiento más homogéneo sobre una sección más amplia, alrededor de 3 mm de diámetro en el centro de la cápsula. La mayor superficie de contacto plana del diseño del címbalo lo hacen más práctico para realizar apilamientos de actuadores y así conseguir mayores desplazamientos. Adicionalmente la nueva estructura de apilamiento múltiple es más estable bajo cargas externas asimétricas uniaxiales. Un apilamiento múltiple de cinco actuadores címbalo con diámetro de 12.7 mm y un espesor total de 10 mm muestra aproximadamente un desplazamiento de 175 mm. Un actuador multicapa estándar con el mismo espesor muestra un desplazamiento de solo 7.5 mm (6).

4.1. Ajuste de propiedades con selección del material:

Los actuadores címbalo amplifican el desplazamiento manteniendo el tipo de respuesta del disco cerámico (piezoelectrica, relaxora o antiferroelectric-ferroelectric), permitiendo así seleccionar el comportamiento de estos. Un actuador címbalo con una cerámica de tipo ferroelectric, por ejemplo $\text{Pb}(\text{Zr}_{1-x}\text{Ti}_x)\text{O}_3$, PZT, muestra un comportamiento en desplazamientos casi lineal. El actuador con una cerámica relaxora, por ejemplo $0.9\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3 \cdot 0.1\text{PbTiO}_3$, PMN-PT, muestra mayores desplazamientos con menores perdidas, pero exhibe un comportamiento no lineal, de acuerdo con las características relaxoras de esta cerámica. El $\text{Pb}_{0.99}\text{Nb}_{0.01}[(\text{Zr}_{0.6}\text{Sn}_{0.4})_{0.94}\text{Ti}_{0.06}\text{I}_{0.98}\text{O}_3]$, PNZST, es un material con transición de fase del tipo antiferroelectric-ferroelectric. Una propiedad única de este material es su expansión volumétrica bajo la acción de un campo eléctrico. Con el diseño de cápsulas de tipo címbalo esta expansión volumétrica se convierte en un desplazamiento axial negativo (7). En la Figura 4 se muestra el efecto del módulo de Young de la cápsula metálica y la dureza de los materiales cerámicos en el

desplazamiento del actuador címbalo (10). Para una misma cápsula metálica hay una dependencia del desplazamiento con el coeficiente piezoeléctrico d_{31} de la cerámica, cuanto mayor sea la contracción del disco cerámico piezoeléctrico en la dirección radial mayor será el desplazamiento axial del actuador. La disminución en el desplazamiento con el aumento de la rigidez está relacionada con mayores pérdidas mecánicas en el movimiento de la cápsula. El desplazamiento del actuador con el metal más rígido es aproximadamente un 52%-57% del obtenido usando las cápsulas de menor rigidez, y es prácticamente independiente del tipo de cerámica. En el caso del latón con $E = 110$ GPa, la mayor diferencia en el coeficiente de expansión térmica con relación a la cerámica causa una reducción en el desplazamiento (11).

Un criterio importante a la hora de evaluar los actuadores es el grado de histéresis, ya que nos informa de las pérdidas que se producen en el desplazamiento. Se define como: $\Delta H\% = 100\Delta X / X_{\max}$ donde X_{\max} es el desplazamiento para el campo eléctrico máximo, en este caso 1 kV/mm, y ΔX es la diferencia entre el desplazamiento cuando el campo está aumentando y el desplazamiento cuando el campo está disminuyendo, ambos medidos en el momento en que el campo alcanza la mitad del máximo (1). Se presenta una pequeña dependencia de la histéresis con la rigidez de las cápsulas metálicas. Los menores valores de histéresis se registraron para composiciones metal-cerámica basadas en cerámicas PZT duras. Los principales razones para las pérdidas de histéresis en cerámicas piezoeléctricas son los mecanismos de inversión de dominios. Los piezoeléctricos cerámicos de clase PZT 5A (12) muestran pérdidas de histéresis de 5-8%. El aumento del comportamiento en histéresis es debido tanto a un aumento de las pérdidas del disco piezoeléctrico como a otras contribuciones, como las pérdidas mecánicas en la capa epoxy y en las regiones de rótulas sólidas de las cápsulas metálicas. Los actuadores tipo címbalo fabricados a partir de un diseño anterior, en el que los ángulos en las cápsulas estaban suavizados, tienen valores de histéresis del 15% (6). Los actuadores con la nueva forma de címbalo obtenidos por prensado, con ángulos vivos que favorecen el movimiento de las rótulas, muestran una reducción en el comportamiento de la histéresis.

El desplazamiento neto es el desplazamiento producido por el actuador para una carga y un campo eléctrico dado menos la deformación de la estructura, es decir, la deformación para esa carga pero sin campo eléctrico aplicado. Se define la fuerza generatriz como la fuerza desarrollada por el actuador para oponerse a la carga externa aplicada. La fuerza generatriz máxima, también denominada fuerza de bloqueo, es aquella para la que el desplazamiento del actuador se hace cero, es decir, se bloquea el actuador. Cuanto menor sea el módulo de elasticidad del metal mayor será el desplazamiento y mayor será la deformación del metal. Por el contrario, la carga máxima, definida como la carga por debajo de la cual el desplazamiento neto se mantiene por encima del 90% del valor inicial, aumenta con el módulo de elasticidad del metal. La figura 5 recoge los datos de carga máxima para diferentes cápsulas metálicas. Los valores obtenidos, 20 N, son bastante mayores que los publicados anteriormente en los actuadores tipo címbalo originales, con los ángulos suavizados (6). La razón de este aumento se atribuye a una transmisión de la fuerza más eficiente debido a cambios en las dimensiones de la cavidad. Por otro lado, el tipo de PZT no tiene demasiada influencia en la carga máxima del actuador. Para todos los tipos de PZT, en el caso de cápsulas de Kovar, la carga máxima es, aproximadamente, 67 N.

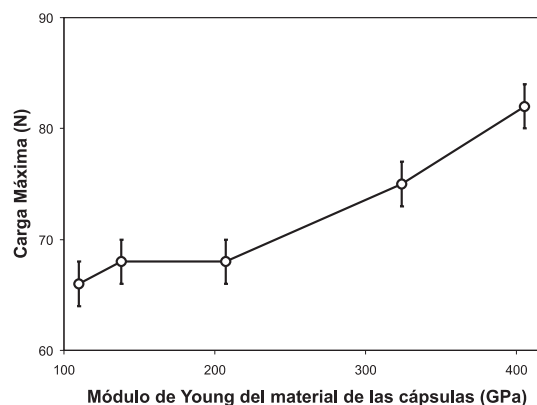


Figura 5. Carga máxima en actuadores tipo címbalo en función del módulo de Young del material de las cápsulas metálicas. Adaptado de (10).

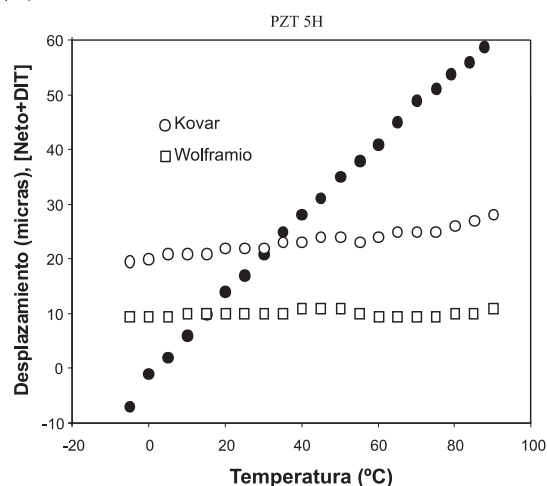


Figura 6. Dependencia del desplazamiento (neto + DIT), para 1 kV/mm, con la temperatura de actuadores tipo címbalo con cápsulas de diferentes metales (20).

El comportamiento frente a la temperatura de los actuadores piezoeléctricos depende de los elementos cerámicos que lo constituyen. Típicamente un PZT 5H comercial (12) tiene un aumento del coeficiente piezoeléctrico, Δd_{31} , de un 30% en un rango de temperaturas entre 0 y 100 °C. La dependencia del comportamiento de la cerámica con la temperatura y el desajuste entre los coeficientes de expansión térmica del metal y de la cerámica es el origen del Desplazamiento Inducido Térmicamente, DIT (5,11,13). La Figura 6 muestra la dependencia con la temperatura de los actuadores cerámicos seleccionados con cerámica PZT 5H, teniendo en cuenta tanto el desplazamiento neto como el DIT. Se observa como, cuando el metal posee un coeficiente de expansión térmica mayor que el de la cerámica, como es el caso del latón, se acentúa la dependencia con la temperatura, porque ambos efectos, la dilatación de la cerámica y el desajuste entre los coeficientes de expansión térmica, se suman. Cuando el coeficiente de expansión térmica es similar en ambos, lo que ocurre para el Kovar, la dependencia con la temperatura es la correspondiente a la cerámica. Es posible conseguir actuadores címbalos sin dependencia con la temperatura (DIT nulo) mediante el ajuste de los coeficientes de dilatación térmica del metal y la cerámica: cuando el coeficiente de dilatación del metal (wolframio) es menor que el de la cerámica ambos efectos se compensan.

TABLA II. COMPARACIÓN ENTRE ACTUADORES PIEZOELÉCTRICOS (6). LOS DATOS DE DESPLAZAMIENTO Y DEPENDENCIA CON LA TEMPERATURA FUERON EVALUADOS PARA CERÁMICAS PZT 5H. LOS ACTUADORES MULTICAPA FUERON EXCITADOS EN EL MODO d_{31} .

	Multicapa	Bimorfo	Luna	Címbalo
Dimensiones	5x5x12.7	12.7x10x1	$\Phi=12.7$ $T=1.7$	$\Phi=12.7$ $T=1.7$
Voltaje de excitación	220	500	1000	1000
Desplazamiento (μm)	-0.8	17	20	40
Fuerza Generatriz (N)	900	0.5-1	3	15
Velocidad de respuesta (μs)	1-5	100	5-50	5-50
$\% \Delta d/d_{TA}$ (0-100°C)	30	30	20	1
Fiabilidad	Media	Alta	Muy Alta	Muy Alta
Coste	Alto	Medio	Bajo	Bajo

4.2. Ajuste de las propiedades mediante diseño del actuador:

En la Tabla II se recogen algunas características de varios diseños de actuadores piezoeléctricos. Se seleccionaron dimensiones similares en todos los actuadores para que la comparación fuera correcta. La facilidad de ajuste de las propiedades del actuador mediante la variación del tamaño de la cavidad y de las dimensiones de las cápsulas, junto con un bajo coste de producción son ventajas adicionales de los actuadores tipo luna y címbalo.

Los problemas más habituales en los actuadores tipo címbalo, en aplicaciones como actuador resonante, son la aparición de dos frecuencias de resonancia para el modo principal de vibración de la cavidad y la variación de la frecuencia de resonancia de unos címbalos a otros. La existencia de dos frecuencias de resonancia, aunque puede ser útil en determinadas aplicaciones que impliquen emisión y recepción con un único dispositivo (14), es, en general, indeseable. Se asume que la asimetría en los diferentes parámetros de las cápsulas como la altura de la cavidad, el diámetro de la cavidad, problemas de pegado y deformaciones asimétricas de la cápsula contribuyen a las características del doble pico (15). Este doble pico de resonancia puede ser corregido mediante la adición de masa en una de las cápsulas (Figura 7a). La altura del pico simple corresponde aproximadamente a la suma de los dos picos anteriores. Esta adición de masa se puede realizar mediante el llenado de la cavidad con un líquido o el pegado exterior de una masa.

Una vez obtenido un pico de resonancia único este puede ser sintonizado posteriormente para adoptar cualquier frecuencia de resonancia por debajo de la inicial, al menos en un intervalo de 10 kHz. Se han encontrado desplazamientos de casi 24 kHz. De esta forma se pueden seleccionar distintas frecuencia de resonancia con un mismo actuador (Figura 7b).

La respuesta en frecuencia en función del diseño de la cavidad se estudio en tres diseños diferentes: un címbalo asimétrico, un címbalo simétrico (ambos con un diámetro de 12.7 mm) y un címbalo asimétrico con un diámetro de 3 mm. En los tres casos el cerámico piezoeléctrico fue PZT 5A, y las cápsulas fueron de Kovar. Se obtuvieron los espectros de impedancia que se muestran en las Figuras 8 a y 8 b. El címbalo asimétrico muestra un mayor número de modos de vibración que el címbalo simétrico. Esto es así porque se produce un

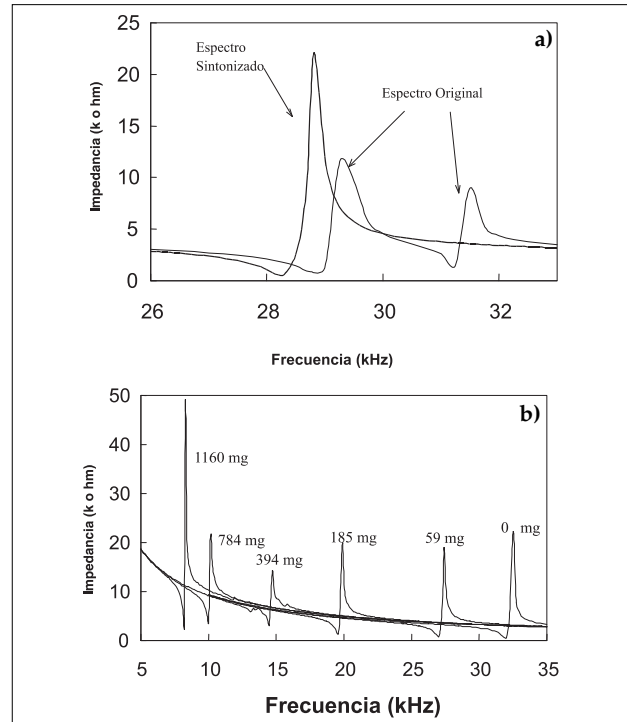


Figura 7. Espectros de impedancia de la cavidad de los actuadores címbalo. 7a) Sintonización del pico de resonancia doble de un címbalo simétrico. 7b) Variación de la frecuencia de resonancia en un actuador tipo címbalo previamente sintonizado mediante la adición de masa (15)

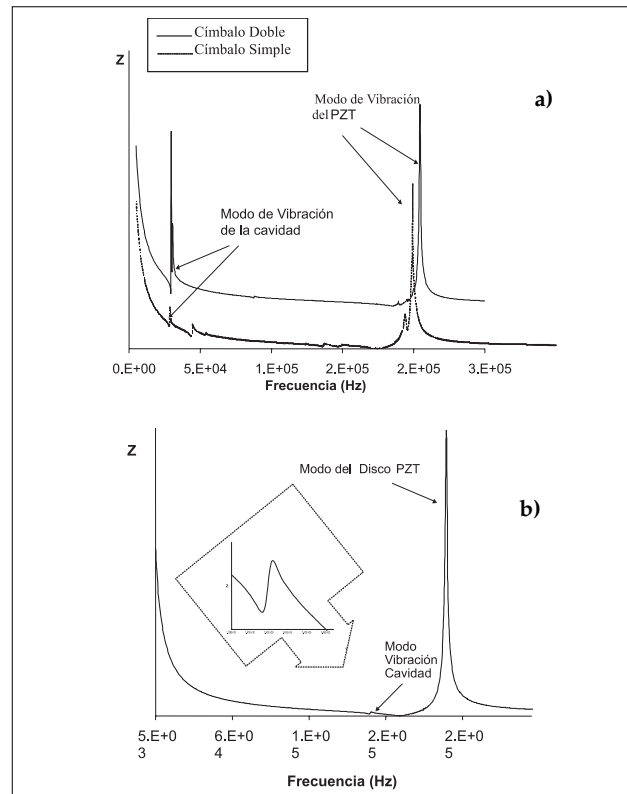


Figura 8. Espectros de impedancia de actuadores tipo címbalo con diferentes geometrías. 8a) Címbalos con diámetro de cavidad de 8 mm. 8b) Címbalos con diámetro de cavidad de 2 mm.

nuevo modo de vibración asociado a movimientos de flexión del sistema, que en el caso del címbalo simétrico se cancelan por la simetría del sistema. El espectro del címbalo asimétrico de 3 mm de diámetro se caracteriza por tener el modo de vibración de la cavidad a una frecuencia mayor que los címbalos de mayor tamaño. La menor masa de címbalo desplaza su modo de vibración de la cavidad a frecuencias más altas. Esto permite contar con un intervalo de frecuencias más amplio para que el dispositivo funcione como actuador no resonante.

Se han realizado cálculos teóricos del coeficiente piezoeléctrico efectivo, d_{33}^{eff} , basados en la modelización de la Figura 9. En ésta se muestra un semipórtico que representa un diferencial de ángulo de un címbalo asimétrico, en el que las condiciones de contorno se reproducen mediante un apoyo articulado y un empotramiento con el movimiento lateral liberado. Los posibles giros en la estructura se introducen en el modelo mediante la rótula R y el apoyo articulado, que permite el giro. Se supone una fuerza puntual por unidad de ángulo de revolución, f , aplicada en el empotramiento. Para el cálculo de las reacciones se aplican las ecuaciones de la estática: suma de fuerzas en la dirección X y en la dirección Y iguales a cero y la suma de momentos a la derecha y a la izquierda de la rótula también cero. Las reacciones en el apoyo articulado serán iguales pero de signo contrario a las fuerzas por unidad de ángulo que ejerce la cápsula metálica en el disco piezoeléctrico. Integrando estas fuerzas para toda la circunferencia y dividiendo por el área en que están aplicadas se obtienen las tensiones radiales, σ_r , y transversales, σ_z , a que está sometido el disco.

$$\dot{\theta}_z = \frac{F}{\delta \cdot r_{\text{ext}}^2} \quad [1]$$

$$\sigma_r = \frac{r_T - r_i}{h} \frac{F}{2\pi r_{\text{ext}} t} \quad [2]$$

Siendo r_T el radio interior mayor de la cavidad, r_i el radio interior menor de la cavidad, r_{ext} el radio exterior de la cápsula, h la altura de la cavidad, t el espesor del disco y F la fuerza total ejercida.

El efecto de la cápsula metálica será la introducción de una componente radial de la tensión, que se suma a la transversal, única componente en el caso de un solo disco de PZT. Dado que el coeficiente piezoeléctrico efectivo es la constante de proporcionalidad entre la tensión aplicada y la polarización inducida en el material piezoeléctrico será, en este caso, una función que depende de los coeficientes piezoeléctricos d_{33} y d_{31} de la cerámica, a diferencia del caso del disco de PZT solo, en el que sería simplemente d_{33} :

$$P_3 = -2d_{31}\sigma_r + d_{33}\sigma_z = d_{33}^{\text{eff}} \frac{F}{\pi r_{\text{ext}}^2} \quad [3]$$

$$k_I^{\text{II}}(G \cdot h) = \pm |G| k_I^{\text{I}}(h) \quad [4]$$

En el címbalo simétrico la tensión en la dirección trasversal es la misma que en el asimétrico, mientras que las contribuciones radiales de ambas cápsulas se suman. Por lo tanto, en este caso la tensión σ_z es la misma que en el anterior, pero la tensión σ_r es el doble. Sustituyendo y despejando igual que en el caso anterior se llega a la expresión:

$$d_{33}^{\text{eff}} = -2d_{31} \frac{r_{\text{ext}}(r_T - r_i)}{h \cdot t} + d_{33} \quad [5]$$

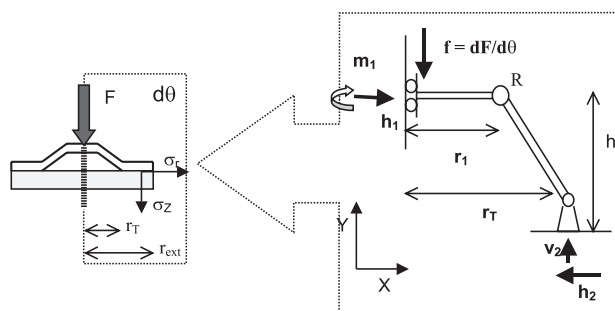


Figura 9. Modelización de un actuador tipo címbalo.

TABLA III. COMPARACIÓN ENTRE LOS ACTUADORES PIEZOELÉCTRICOS (6). LOS DATOS DE DESPLAZAMIENTO Y DEPENDENCIA CON LA TEMPERATURA FUERON EVALUADOS PARA CERÁMICAS PZT 5H. LOS ACTUADORES MULTICAPA FUERON EXCITADOS EN EL MODO d_{31} .

	d_{33}^{eff} Experimental (pC/N)	d_{33}^{eff} Teórico (pC/N)
Címbalo asimétrico $d=12.7\text{mm}$	4500 ± 650	6477 ± 825
Címbalo doble $d=12.7\text{mm}$	12060 ± 600	12526 ± 825
Címbalo asimétrico $d=3\text{mm}$	700 ± 50	812 ± 723

En la Tabla III se comparan los resultados teóricos con los experimentales. En el caso del címbalo asimétrico vemos que, aunque se aproxima, no se ajusta al valor experimental, debido a que en el modelo teórico no tiene en cuenta la flexión del disco. En el címbalo simétrico la simetría impide la flexión y los resultados teóricos se ajustan mejor a los experimentales. En el caso del címbalo de 3 mm de diámetro se deben considerar dos factores, por un lado la posible flexión del disco, es un címbalo asimétrico con una sola cápsula, y por otro que la geometría de las cápsulas, ya que debido al proceso de fabricación, es diferente. La estructura del címbalo de 3 mm de diámetro parece a priori más rígida, por lo que el modelo con una rótula y un apoyo articulado podría presentar limitaciones. Sin embargo los resultados obtenidos son mejores que en el címbalo asimétrico de 12.7 mm. El estudio de la forma real del címbalo de 3mm de diámetro revela que en la zona donde, en el modelo teórico, se supone la rótula existen unas hendiduras introducidas por el troquel que flexibilizan los movimientos en la cápsula. Además en esta zona las tensiones durante el procesado han sido superiores que en el resto, por lo que es posible que se haya producido una plastificación local. Todo esto apunta a que en modelo con una rótula se ajusta bien. Por otro lado, el espectro de impedancia del címbalo de 3 mm no presenta modos de vibración de flexión, así que la componente de flexión, si la hay, es mucho menor.

Este modelo es una primera aproximación que no contempla la falta de uniformidad de los esfuerzos en el área de integración, ni el esfuerzo circunferencial. Sin embargo, el modelo funciona razonablemente en los tres casos considerados.

Mediante la técnica del vibrómetro láser de efecto Doppler se han realizado medidas del desplazamiento de la superficie de un címbalo asimétrico (16). Se hace incidir un haz láser sobre la superficie de la muestra, que se encuentra vibrando a una frecuencia dada, y se recoge el haz reflejado. Barriando la superficie con el haz láser podemos obtener la velocidad de vibración de una red imaginaria sobre la superficie del disco

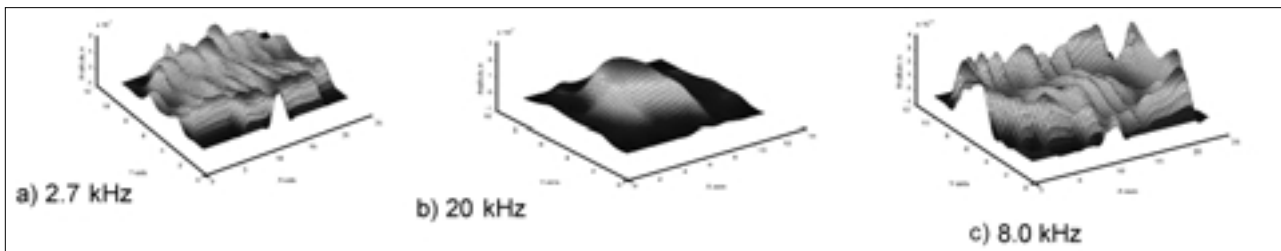


Figura 10. a) y b) Modos de vibración mediante vibrometría láser del címbalo láser del címbalo asimétrico por la cara de la cápsula. c) Modos de vibración mediante vibrometría láser del címbalo asimétrico por la cara del PZT (16).

para cada frecuencia de excitación (0 – 25 kHz), y a partir de estos datos, los desplazamientos en cada punto. Los resultados se muestran en la Figura 9. A 2.7 kHz se obtiene un modo asimétrico, que se puede denominar de “alas de mariposa” o de “doble ala”, con mayor amplitud en los bordes del piezocomposite que en el centro, y que se asocia al anclaje de la muestra en el soporte, que produce unas restricciones al movimiento que son las responsables de este modo. En el resto de los modos se ve la deformación de la cápsula, más pronunciada en el centro y menor en los puntos en la zona más exterior, que son los puntos de unión de la cápsula con la cerámica. Estos modos se asocian con movimientos de flexión de un disco cerámico vibrando libre, no así el primer modo a 2.7 kHz, que está asociado a modos de flexión de un disco anclado en un punto. A 20 kHz se aprecia una deformación casi un orden de magnitud mayor que en los modos anteriores, por lo que asociamos este modo con el de resonancia de la cavidad. Este modo aparece a 20 kHz y no a los 28 kHz obtenidos por otros métodos debido a que en éste es necesario recubrir la muestra con una película retrodispersora que asegure que el haz reflejado tenga exactamente la misma dirección que el incidente. La adición de masa provoca el desplazamiento de los modos de resonancia a frecuencias menores. También se ha estudiado con esta misma técnica la deformación que se produce en el címbalo asimétrico en la cara de la cerámica. A 2.7 kHz aparece otra vez el modo asimétrico de alas de mariposa. A las demás frecuencias se observa una doble tendencia. Por un lado, de manera similar a lo que se vio en la cara del Kovar, va apareciendo un máximo relativo en el centro de la pastilla, mientras que por otro lado se conservan los valores máximos de amplitud en los bordes de la pastilla. A lo anterior se añade el hecho de la formación de un nodo en forma circular que separa las zonas vibrantes del borde y centro de la pastilla, en la zona en que, por la otra cara, la cerámica se une a la cápsula metálica. La rigidez mecánica de la cápsula metálica se transmite a través del espesor de la pastilla cerámica, produciéndose el nodo en forma de anillo en la cerámica. Estas deformaciones se verán impedidas si el disco se adhiere a alguna superficie, siendo una fuente importante de acumulación de tensiones que deberá ser tenida en cuenta para cualquier aplicación práctica.

5. APLICACIONES

Tres de las principales aplicaciones presentes en la literatura (8,17-19) de un piezocomposite tipo luna o címbalo son: sistemas de eliminación de vibraciones, hidrófonos y acelerómetros.

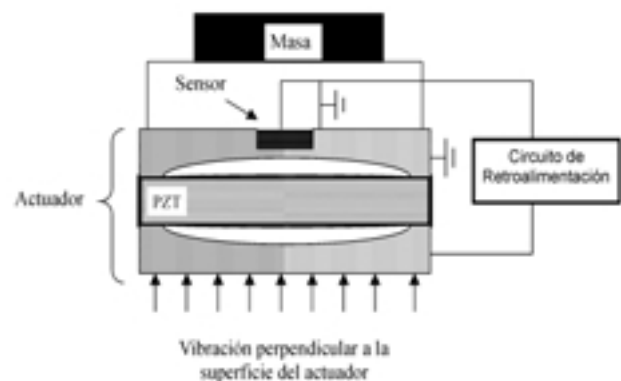


Figura 11. Diseño de un sistema de control activo de vibraciones.

5.1. Sistemas de eliminación de vibraciones:

Los “materiales inteligentes” tienen la habilidad de actuar tanto como actuador como sensor. Los materiales inteligentes pasivos responden a un cambio externo eficientemente sin ayuda, mientras que los materiales inteligentes activos tienen un bucle de retroalimentación que les permite tanto reconocer el cambio externo como modificarse a sí mismos por medio de un circuito actuador (8). Un transductor tipo luna puede emplearse en el control activo de vibraciones mediante la integración de sus funciones de actuador y sensor en un solo dispositivo. El diseño (Figura 11) consiste en un sensor de PZT-5A de un espesor de 0.10 mm y una longitud de 2.5 mm, embebido dentro de la cápsula superior de un actuador tipo luna estándar (11 mm de diámetro y 3 mm de espesor). El sensor detecta vibraciones sinusoidales externas perpendiculares a la superficie de la cápsula. Entonces, a través del bucle de retroalimentación, se aplica una señal de la amplitud y fase adecuadas al actuador, de forma que este cancela eficientemente la vibración externa (17). Este prototipo de sensor/actuador es capaz de detectar y suprimir en tiempo real vibraciones de baja amplitud (< 1 μ m) y fuerza pequeña (<1 N). Cuando el circuito de retroalimentación está activado, el prototipo es capaz de suprimir completamente el efecto de una vibración externa cuya frecuencia este entre 100 Hz y, al menos, 2500 Hz. Las aplicaciones potenciales para este dispositivo incluyen sistemas ópticos activos, sistemas de supresión en rotores y otros dispositivos de eliminación de vibraciones de bajo nivel.

5.2. Acelerómetros:

Los acelerómetros son ampliamente utilizados en ingeniería, tanto como herramientas de investigación y desarrollo como componentes de sistemas de control. Una de las técnicas más populares de medida de aceleraciones es emplear el efecto piezoeléctrico. Las cerámicas basadas en PZT muestran un coeficiente piezoeléctrico d_{33} elevado, pero no lo suficientemente alto como para medir aceleraciones de forma eficiente. Una estructura compuesta metal-cerámica piezoeléctrica con un coeficiente d_{33} efectivo muy alto es una buena alternativa como sensor de aceleración (18). La sensibilidad en función de la frecuencia de un disco de PZT-5H sencillo y transductores tipo címbalo con cápsulas de varios metales muestra el mismo comportamiento: aumenta rápidamente hasta una frecuencia de 30 Hz, para luego mantenerse constante. Sin embargo un transductor tipo címbalo permite obtener una sensibilidad 50 veces mayor que un disco de PZT sin encapsular, siendo mayor cuanto más rígido sea el material de la cápsula. La sensibilidad de un transductor de aceleración de este tipo depende más de la estructura y geometría de la cápsula metálica (espesor, módulo de elasticidad...) que de las propiedades elásticas y piezoeléctricas del disco de PZT.

5.3. Hidrófonos:

Una aplicación importante de un transductor ultrasónico es su utilización como hidrófono, un dispositivo empleado en la detección de ondas de presión débiles en fluidos. Los transductores piezoeléctricos son muy empleados como hidrófonos debido a su tolerancia a presiones elevadas, constante dieléctrica grande, coeficiente piezoeléctrico de carga hidrostático (d_h) elevado, coeficiente piezoeléctrico de voltaje (g_h) alto, y en consecuencia una figura de mérito ($d_h \cdot g_h$) grande (9). Cuando una cerámica piezoeléctrica es sometida a una presión hidrostática se genera una carga en la dirección de polarización. La magnitud de esta carga es directamente proporcional a d_h , que es igual a la respuesta del modo en espesor (d_{33}), más la respuesta del modo planar ($d_{31} + d_{32}$). El coeficiente d_{31} ($= d_{32}$ debido a la simetría en forma de disco) del PZT tiene distinto signo y es aproximadamente la mitad del coeficiente d_{33} , por lo tanto su coeficiente d_h ($= d_{33} + 2d_{31}$) es muy pequeño. Además, el coeficiente g_h es pequeño debido a la gran permitividad del PZT (19). En la última década se han desarrollado varios compuestos con diferentes conectividades para su utilización como hidrófonos. Las ventajas de estos compuestos sobre las cerámicas son: figuras de mérito mayores que aumentan la sensibilidad, complianzas mecánicas menores, más semejantes a la del agua o a la del papel, y coeficientes de acoplo electromecánico transversales menores. Mientras que con discos de cerámicas piezoeléctricas se obtienen figuras de mérito de $2 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2/\text{N}$ con los materiales compuestos se consigue aumentar varios ordenes de magnitud, encontrándose los mejores resultados para los actuadores tipo luna y címbalo, alcanzándose en el caso de estos últimos valores superiores a los $10^{-9} \text{ m}^2/\text{N}$. Los compuestos tipo luna y címbalo aumentan d_h ya que transforman una parte de la tensión en la dirección transversal en una tensión radial grande y de signo opuesto de tal forma que las contribuciones de los coeficientes d_{33} y d_{31} al d_h se suman. Estos actuadores muestran elevada sensibilidad hidrostática, junto con tolerancias a altas presiones grandes con envejecimientos muy pequeños.

6. CONCLUSIONES

Las propiedades y comportamiento de los composites metal-cerámica con conectividades 2(0)-2-2(0) pueden ser diseñadas mediante la selección de los materiales y la geometría de los mismos. Esto permite un amplio rango de aplicaciones y una gran versatilidad debido a sus características únicas de sintonización que permiten seleccionar distintas frecuencias de resonancia con un mismo actuador. Se ha encontrado que la disminución del tamaño de la cápsula metálica implica un aumento de la frecuencia de resonancia de la cavidad lo que permite contar con un intervalo de frecuencias más amplio en el que el dispositivo es capaz de comportarse como actuador no resonante, a la vez que aumenta la velocidad de respuesta del mismo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero para la realización de este trabajo CICYT bajo el proyecto MAT97-0694-C02-01.

BIBLIOGRAFÍA

1. K. Uchino, "Ferroelectric Devices", Marcel Dekker, New York, 2000.
2. B. Jaffe, W. R. Cook, Jr, H. Jaffe, "Piezoelectric Ceramics", Academic Press New York 1972.
3. K. B. Hathaway, A. E. Clark, "Magnetostrictive Materials", Mat. Res. Soc. Bull. 18,4,34-41 (1993).
4. C. M. Wayman, "Shape Memory Alloys", Mat. Res. Soc. Bull. 18,449-56 (1993).
5. Y. Sugawara, K. Onitsuka, S. Yoshikawa, Q. Xu, R. E. Newnham and K. Uchino, "Metal-Ceramic Composite Actuators". J. Am. Ceram. Soc. 75,4,996-999 (1992).
6. A. Dogan, "Flexensional 'Moonie and Cymbal' Actuators", Ph. D. Thesis. The Pennsylvania State University, University Park, PA (1994).
7. A. Dogan, J.F. Fernández, K. Uchino, R. E. Newnham. "New Piezoelectric Composite Actuator Designs for Displacement Amplification". IV Euroceramics Vol 5 pp 127-32. Ed. G. Gusmano and E. Traversa. Faenza Editrice S.A. Italy 1995.
8. J.F. Fernández, A. Dogan, J.F. Tressler, Q. M. Zhang and R. E. Newnham, "Hollow Piezoelectric Composites", Sensor and Actuators A Physical, 51, 183-196 (1996).
9. K. Onitsuka, A. Dogan, J.F. Tressler, Q.C. Xu, S. Yoshikawa, R. E. Newnham, "Smart Metal-Ceramic Composite Transducer, 'Moonie'", Ferroelectrics 156, 37-42 (1994).
10. J.F. Fernández, A. Dogan, J.F. Tressler, K. Uchino, R. E. Newnham. "Tailoring Performance of Cymbal Actuators", Sensor and Actuators A Physical 65, 2-3, 228-237 (1998).
11. J.F. Fernández, A. Dogan, J. T. Fielding, K. Uchino, R. E. Newnham. "Temperature Dependence of New Design Ceramic-Metal Actuators" IV Euroceramics, V.5 pp 133-38. Ed. G. Gusmano, E. Traversa. Faenza Editrice SA, Italy 1995.
12. Morgan Matroc S.A. Catálogo de productos. Bedford, OH, USA.
13. A. Dogan, K. Uchino, R. E. Newnham. "Composite Piezoelectric Transducer with truncated conical endcaps 'Cymbal'", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 44, 3, 597-605, (1997).
14. J.F. Tressler, R. E. Newnham, "Doubly Resonant Cymbal-Type Transducers", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Vol. 44, nº 5, 1175-1177, (1997).
15. P. Leidinger, "Tunability of Cymbals as Piezoceramic-Metal Transducers", Diplomarbeit, Instituto de Cerámica y Vidrio, C.S.I.C., Madrid, 1996.
16. R. Ruiz Bouillosa, S. Cortés Frago, J. Saniger Blesa, M. E. Villafuerte Castrejón, G. González, P. Ochoa, M. Villegas y J.F. Fernández. "Caracterización Vibracional de Piezocomposites Metal-Cerámica Asimétricos", Bol. Soc. Esp. Cerámica y Vidrio, 38, 5, 503-506 (1999).
17. R. E. Newnham, A. Dogan, Q.C. Xu, K. Onitsuka, J.F. Tressler, and S. Yoshikawa, "Flexensional 'Moonie' Actuators". International Centre for Actuators and Transducers. The Pennsylvania State University, University Park, PA 16802.
18. B. Koc, A. Dogan, J.F. Fernández, R. E. Newnham and K. Uchino. "Accelerometer Application of Modified Moonie (Cymbal) Transducer". The Pennsylvania State University. Jpn. J. Appl. Phys. 35, 4547-4549 (1996).
19. J.F. Tressler, A. Dogan, J.F. Fernández, J. T. Fielding, Jr, K. Uchino and R. E. Newnham. "Capped Ceramic Hydrophones", IEEE Ultrasonics Symposium pp. 897-900, Ed. M. Levy, S.C. Scheider, B.R. McAvoy, Seattle WA USA (1995).

Recibido: 31.07.00

Aceptado: 24.01.01